



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2007

Europäische Alpen bald ohne Gletscher?

Zemp, Michael ; Haeberli, W ; Hoelzle, M ; Maisch, M

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-34257>

Book Section

Published Version

Originally published at:

Zemp, Michael; Haeberli, W; Hoelzle, M; Maisch, M (2007). Europäische Alpen bald ohne Gletscher? In: Altner, G; Leitschuh, H; Michelsen, G; Simonis, U E; von Weizsäcker, E U. Jahrbuch Ökologie. München: Beck, 68-82.

*Michael Zemp/Wilfried Haeberli/Martin Hoelzle/
Max Maisch/Frank Paul*

Europäische Alpen bald ohne Gletscher?

Gletscher sind in dicht besiedelten Hochgebirgsregionen wie den Europäischen Alpen ein fester Bestandteil der alpinen Kultur, Landschaft und Umwelt. Sie sind aber nicht nur ein faszinierendes Element der Natur, sie bilden auch eine bedeutende Süßwasserressource und stellen eine wichtige Komponente für den Tourismus und die Nutzung von Wasserkraft dar. Sie bergen allerdings auch eine potenzielle Quelle für Gefahren. Da sich die Alpengletscher im Sommer bis auf null Grad Celsius erwärmen und sich damit nahe am Schmelzpunkt befinden, reagieren sie äußerst sensibel auf Temperaturänderungen. Schon eine minimale Temperaturerhöhung von einem Zehntel Grad pro Dekade kann, wenn sie über einen längeren Zeitraum wirksam ist, einen ausgeprägten Rückgang der Gletscherzungen bewirken.

Die Gebirgsgletscher der Erde zählen in der globalen Umweltbeobachtung zu den aussagekräftigsten natürlichen Klimaindikatoren und wurden so zu Leitsymbolen in der gegenwärtigen Diskussion zum Klimawandel. Mit ihren Dimensionsänderungen verdeutlichen sie auf frappierende Weise die Veränderungen des Klimasystems (*Abbildung 1*). Zudem liefert die Erforschung der Gletschergeschichte aufschlussreiche Informationen über die spätglaziale und holozäne Klimavariabilität (Zeitraum ca. 20000–10000 Jahre vor heute, respektive ab 10000 Jahre vor heute), was im Vergleich eine realistische Einschätzung der gegenwärtigen Entwicklung ermöglicht.

Dieser Beitrag basiert auf verschiedenen neueren wissenschaftlichen Publikationen der Autoren und stellt die wichtigsten Fakten und Zusammenhänge zum Thema Gletscheränderungen in den Europäischen Alpen dar.



Abbildung 1: Vernagtferner in Österreich. Die Aufnahmen stammen von O. Gruber (1912), H. Schatz (1938), H. Rentsch (1968) und M. Siebers (2003) und wurden freundlicherweise von der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zur Verfügung gestellt.

Wie reagieren Gletscher auf Klimaänderungen?

Gletscher können sich überall dort halten, wo über Jahre und Jahrzehnte die Schneeakkumulation des Winters über den Sommer nicht vollständig abgeschmolzen wird. Dieser mehrjährige Schnee verdichtet sich allmählich, wird über verschiedene Prozesse der Schneewandlung zu Firn und zuletzt, nach der Schließung der verbindenden Luftpassagen, zu Eis. Die räumliche Verteilung der Gletscher in den Alpen ist primär eine Funktion der mittleren Jahrestemperatur und des jährlichen Niederschlages, modifiziert durch die Topografie. Diese beeinflusst zum Beispiel die Menge der einfallenden Strahlung oder die räumliche Verteilung der Schneeakkumulation.

Die Reaktion eines Gletschers auf eine Änderung des Klimas umfasst eine komplexe Prozesskette. Eine Änderung in der Energiebilanz führt, über Änderungen der Massenbilanz und der Eis-/Firntemperatur, zu einer Anpassung der Fließgeschwindigkeit und der Geometrie des Gletschers und resultiert schlussendlich in einer Längenänderung. Bei einem Massengewinn nimmt die Fließgeschwindigkeit des Eises zu. In der Folge kann, nach einer gletscherspezifischen Verzögerungszeit, die Schmelze am Zungenende den nun schnelleren Eisantrieb nicht mehr wegschmelzen, und der Gletscher stößt vor. Kurz gesagt, die Massenbilanz eines Gletschers (seine totale jährliche Volumenänderung) ist das direkte unverzögerte Signal auf die jährliche Witterung, während die Längenänderung (Vorstoß oder Schwund der Gletscherzunge) ein indirektes, verzögertes und gefiltertes Signal auf eine Klimaänderung darstellt.

Postglaziale und holozäne Gletscheränderungen

Während des Maximalstandes der letzten Eiszeit (Zeitraum vor 20 000–25 000 Jahren) betrug die Fläche aller Alpengletscher rund 150 000 km². Im Norden reichten die Gletscherzungen bis weit ins Alpenvorland hinaus, im Süden stießen sie bis an den Rand der Po-Ebene vor. In Zürich zum Beispiel, 15 km von den maximalen Endlagen entfernt, betrug die Mächtigkeit des Gletschereises noch rund 300 m. Die letzteiszeitlichen Gletscherstände und die nachfolgenden Fluktuationen können mit verschiedenen Methoden unterschiedlicher Genauigkeit und zeitlicher Abdeckung rekonstruiert werden.

Nach dem Maximalstand der letzten Eiszeit begannen sich die Alpengletscher zwischen 20 000 und 11 500 Jahren vor heute schritt-

weise zurückzubilden. In typischem Muster hintereinander gestaffelte Moränensequenzen zeugen von verschiedenen zwischenzeitlichen Wiedervorstößen während des generellen Schwundes der Gletscherzungen aus dem Vorland in die Alpentäler. Die Moränenserien der sog. Jüngeren Dryas (Zeitraum ca. 12 600–11 500 Jahre vor heute) bilden in vielen Hochtälern der Alpen ganz auffällige Geländeformen und markieren den letzten Gletschervorstoßzyklus des ausgehenden Spätglazials. Die wiederholten Gletschervorstöße des Holozäns (Zeitraum ab ca. 11 500 Jahre vor heute) erreichten auf deutlich reduziertem Schwankungsniveau oftmals ähnliche Ausdehnungen. Der Gletscherhochstand von 1850/60 umreißt am Ende der Kleinen Eiszeit in den meisten Regionen der Alpen die maximale Eisausdehnung des gesamten Holozäns.

In *Abbildung 2* ist das Verhalten von drei ausgewählten Alpengletschern (Großer Aletsch, Gorner, Unterer Grindelwald) über die letzten 3 500 Jahre dargestellt. Kleine Gletscherstände sind während der Bronzezeit, am Übergang von Eisen- zu Römerzeit und während des Mittelalters zu beobachten. Markante Vorstoßphasen sind um 1000–600 v. Chr., in den Jahren 500–600, 800–900, 1100–1200 sowie während der Kleinen Eiszeit (1300–1860) festzustellen. Es gibt Hinweise über datierte Baumstrünke und Torfreste aus den Vorfeldern langer und tief reichender Gletscher, dass diese zwischen den holozänen Vorstoßphasen auch schon mal mindestens so kurz waren wie gegen Ende des 20. Jahrhunderts. Archäologische Funde der letzten Jahre wie die des Ötztaler Eismannes (*Ötzi*) in einem Bergsattel an der Grenze zwischen Österreich und Italien, des Holzbogens am Lötchenpass und der Lederkleider und Köcherfragmente am Schnidejoch in den Schweizer Alpen, zeigen, dass die Eisbedeckung an diesen Stellen während der letzten 5000 Jahre höchstwahrscheinlich nie geringer war als heute (genauer gesagt: als zum Zeitpunkt der Funde).

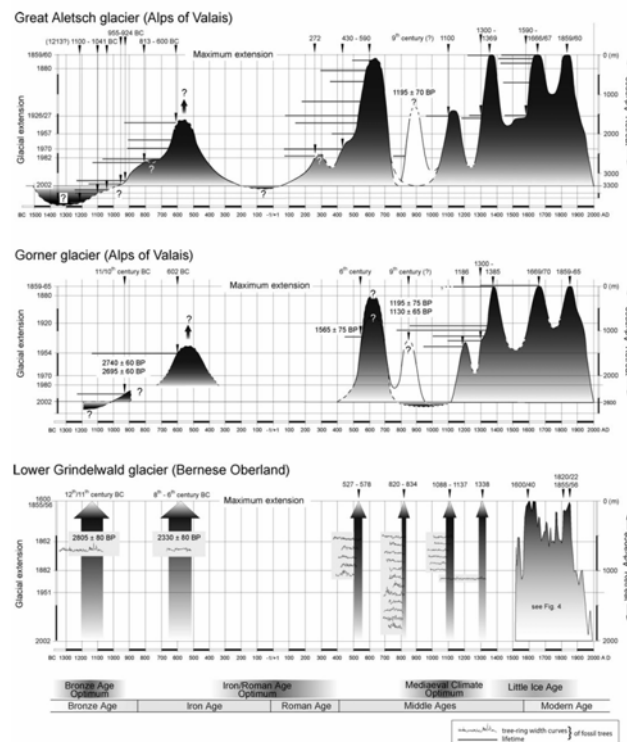


Abbildung 2: Rekonstruierte Längenänderungen des Großen Aletsch-, Gorner- und Unteren Grindelwald-Gletschers in der Schweiz über die letzten 3500 Jahre. Quelle: Holzhauser et al. 2005.

Die Ursache für die großen Eiszeitzyklen mit Perioden von 21000–23000, 41000 und 100000 Jahren ist in den Variationen der Erdbahnparameter (sog. Milankovic-Zyklen) zu suchen, wobei auch die Variabilität der Sonnenaktivität, die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und interne Klimamechanismen sowie Vulkanausbrüche und Meteoriteneinschläge von extremer Dimension einen Einfluss haben können. Der generelle Gletscherrückgang nach dem Maximum der letzten Eiszeit, ab etwa 20000 Jahren vor heute bis zum frühen Holozän (ca. 11500–6000 Jahre vor heute), geht einher mit einer allgemeinen globalen Erwärmung, wie sie auch mit anderen Klimaindikatoren (z.B. Eisbohrkernen, Baumringen, Pollen, Seesedimenten) rekonstruiert werden konnte.

Wiedervorstöße der Gletscher im Zeitraum vor 8200 Jahren wurden möglicherweise durch Änderungen in der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik und einer nachfolgenden Abkühlung ausgelöst, verursacht durch Ausbrüche des Lake Agassiz auf dem Nordamerikanischen Kontinent. Die Ursachen für die holozänen Schwankungen der Alpengletscher mit dem Maximalstand um 1850 sind in der Intensität der Solarstrahlung (in Abhängigkeit mit den Erdbahnelementen und der Sonnenaktivität) zu suchen, welche auf der Nordhemisphäre zu Beginn des Holozäns hoch war und dann abnahm. Diese Trends wurden überlagert durch Einflüsse von Vulkanausbrüchen, der globalen Klimadynamik sowie möglicherweise von ersten anthropogenen Einflüssen (besonders Landnutzungsänderungen). Das Verständnis der quasinatürlichen Gletschervariabilität und ihrer Ursachen im Spätglazial und Holozän ist wichtig für die Beurteilung der gegenwärtigen und potenziellen Trends der Klimaentwicklung und des Gletscherschwundes.

Die Evidenzen der rekonstruierten Gletscherstände müssen bei der Verwendung der Gletscher als Klimaindikatoren allerdings mit Vorsicht interpretiert werden. So ist die Längenänderung eines Gletschers, wie oben bereits erwähnt, ein indirektes und gefiltertes Klimasignal, das einer gletscherspezifischen Verzögerung unterliegt. Die heutige (2007) Gletscherausdehnung ist beispielsweise immer noch viel zu groß für die klimatischen Bedingungen der letzten Jahre. Selbst wenn sich der Temperaturtrend der letzten 25 Jahre nicht fortsetzen sollte, würden sich die größeren Alpengletscher noch einige Jahre bis Jahrzehnte weiter zurückbilden, um ihre Ausdehnung mit dem aktuellen Klima wieder in Einklang zu bringen.

Gletscheränderungen seit Ende der Kleinen Eiszeit (um 1850)

Systematische Gletscherforschung mittels kontinuierlicher Messreihen hat in den Alpenländern eine lange Tradition und setzte mit der Einrichtung von nationalen Messnetzen in den 1890er-Jahren ein. Im Unterschied zu anderen Eisregionen der Welt existiert für die Alpen einer der komplettesten Datensätze über die räumliche Verteilung und die zeitlichen Änderungen der Gletscher.

Diese Daten werden heute durch den World Glacier Monitoring Service mit Sitz in Zürich verwaltet und laufend weitergeführt (www.wgms.ch). Für die 1970er-Jahre, als sich die meisten Gletscher

relativ nahe an einem Gleichgewichtszustand befanden, existiert ein komplettes, luftbildbasiertes Inventar der rund 5150 Alpengletscher, die eine Gesamtfläche von 2909 km² aufwiesen. Damals waren 90 % der Gletscher kleiner als 1 km² und bedeckten zusammen eine Fläche von rund 900 km². Die sieben größten Alpengletscher (Großer Aletsch, Gorner, Fiescher, Unteraar, Unterer Grindelwald und Oberaletsch in der Schweiz sowie Mer de Glace in Frankreich) umfassten zusammen rund 10% der alpinen Gletscherfläche. Das alpine Eisvolumen um 1970 wird – je nach Methodik – auf 100 bis 140 km³ geschätzt, was einem potenziellen Meeresspiegelanstieg von lediglich 0,3 mm entspricht (zum Vergleich: Der potenzielle Meeresspiegelanstieg der Eisschilde in Grönland und der Antarktis beträgt 7,5 m respektive 73 m). Weitere Inventare existieren für Österreich und die Schweiz für den Maximalstand um 1850, basierend auf alten topografischen Karten und Rekonstruktionen aus Moränenständen, sowie für den Zeitraum um 2000, aus Satellitendaten für die Schweiz (siehe *Abbildung 3* für ein Beispiel) und aus Luftbildern für Österreich. Anhand der Gletscheränderungen 1850–1970–2000 aus den Schweizer Inventaren und dem alpinen Gesamtinventar aus den 1970er-Jahren kann die gesamtalpine Gletscherfläche für 1850 auf ca. 4470 km² und für 2000 auf 2270 km² geschätzt werden. Daraus ergibt sich ein Flächenschwund von rund 35 % von 1850 bis in die 1970er Jahre und von weiteren 22 % bis ins Jahr 2000. Der entsprechende Verlust in Bezug zum alpinen Eisvolumen um 1850 wird auf rund 50 % bis in die 1970er-Jahre und nochmals 25 % bis ins Jahre 2000 geschätzt. Insgesamt entspricht dies einem Schwund der alpinen Gletscherfläche um die Hälfte und des alpinen Eisvolumens um zwei Drittel in 150 Jahren.

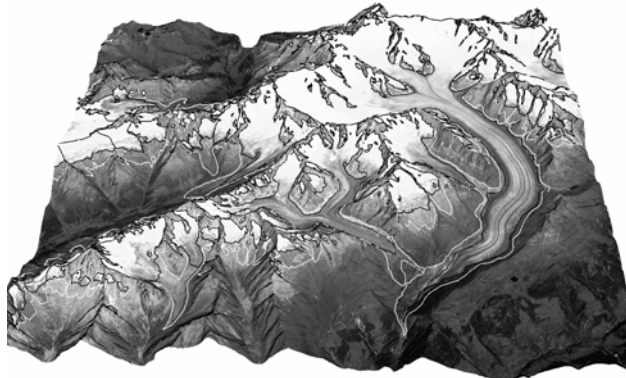


Abbildung 3: 3-D-Ansicht der Aletsch-Region in der Schweiz, generiert aus einem digitalen Geländemodell (DHM25 reproduziert mit Bewilligung von swisstopo, BA00XXXX) überlagert mit fusionierten Satellitenbildern von Landsat TM (1998) und IRS-1C (1997). Der Große Aletsch-Gletscher zog sich zwischen 1850 (weiße Linien) und 1973 (schwarze Linien) um rund 2550 m zurück und noch einmal um 680 m bis ins Jahr 2000. Quelle: Zemp et al.

Beobachtungsreihen von Längenänderungen sind von mehr als 600 Alpengletschern verfügbar, wobei die ersten Messungen bereits um 1880 einsetzen. Diese Messungen zeigen, eingebettet in den allgemeinen Gletscherrückgang seit 1850, drei Wiedervorstoßphasen, nämlich in den 1890er- und 1920er-Jahren sowie zwischen 1970 und Anfang der 1980er-Jahre. Diese Vorstoßphasen sind vor allem bei den mittelgroßen, steilen Gebirgsgletschern zu sehen, während die großen Talgletscher seit ihrem Maximalstand um 1850 nahezu kontinuierlich zurückgewichen sind. Die Längenänderungsdaten der kleinen Gletscher weisen typischerweise eine hohe jährliche Variabilität auf (*Abbildung 4*).

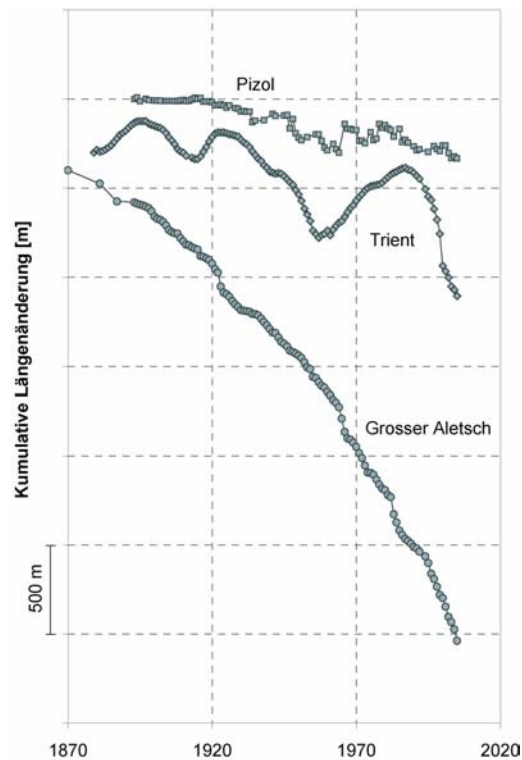


Abbildung 4: Kumulative Längenänderungen zwischen 1870 und 2005, gemessen am Großen Aletsch (23,95 km, 86,63 km²), Trient (4,90 km, 6,40 km²) und Pizol-Gletscher (0,60 km, 0,21 km²). Die absoluten Längen- und Flächenangaben beziehen sich auf das Jahr 1973. Daten: World Glacier Monitoring Service und Glaziologische Kommission der Akademie der Naturwissenschaften der Schweiz.

Abgesehen von Ablesungen an zwei Firnpegeln am Claridenfirn seit 1917 begannen direkte Massenbilanzmessungen in den Alpen im Jahre 1947 auf den Gletschern Limmern und Plattalva (Schweiz), gefolgt von Messungen auf dem Glacier de Sarennes (1948, Frankreich), dem Hintereis- und Kesselwandferner (1952, Österreich) sowie auf weiteren 22 Gletschern in den Folgejahren. Ab 1967 bis 2005 sind kontinuierliche Messreihen von neun Alpengletschern verfügbar (siehe *Abbildung 5*). Diese Daten zeigen einen klaren Trend des Massenverlustes über die letzten 50 Jahre. Einige Gletscher konnten zwischen 1960 und 1980 zwar an Masse zulegen; ab Mitte der 1980er-

Jahre zeichnet sich jedoch einheitlich ein klarer Trend zum kontinuierlichen und beschleunigten Massenverlust ab. Seit der Jahrtausendwende (2000–2005) weisen die neun Referenzgletscher einen mittleren jährlichen Dickenverlust von rund 1,0 m Wasseräquivalent (w.e.) auf. Das ist rund 30 % mehr als der mittlere jährliche Eisverlust der 1990er Jahre und rund das 2,3-fache der Schwundrate der 1980er Jahre. Der mittlere Dickenverlust über die letzten 25 Jahre (1981–2005) betrug 0,75 m w.e. pro Jahr. Dieser Eisschwund ist rund dreimal schneller als jener über die Zeitperiode nach 1850 und als entsprechende längerfristige Massenänderungen während der vergangenen 2000 Jahre (rekonstruiert aus kumulierten Längenänderungen). Kumuliert über die letzten 25 Jahre haben die neun Referenzgletscher im Mittel rund 18,5 m w.e. an Eisdicke eingebüßt, 2,5 m w.e. davon alleine im Jahr 2003, als Europa im Sommer eine außerordentliche Hitzewelle erlebte. Der beschleunigte Eisverlust nach 1980 hat zur Folge, dass der Gletscherschwund zurzeit eher über einen Zerfall an Ort und Stelle vor sich geht, als dass sich die Gletscher dynamisch über einen Zungenrückzug den neuen Klimaverhältnissen anpassen.

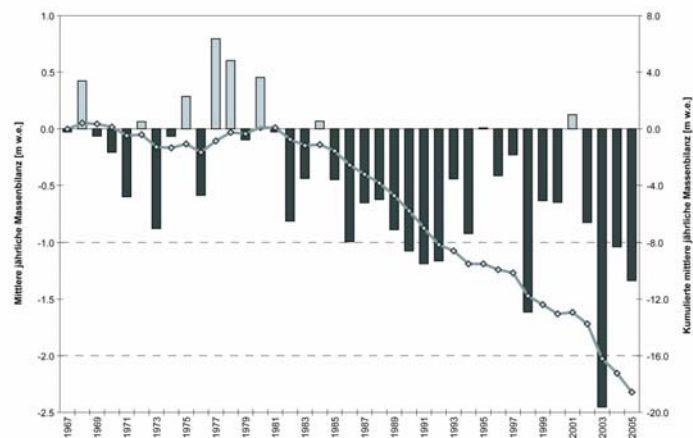


Abbildung 5: Mittlere jährliche (Balken) und kumulierte (Linie) Massenbilanz der neun Alpengletscher mit kontinuierlichen Messreihen seit 1967 (Saint Sorlin und Sarennes in Frankreich; Silvretta und Gries in der Schweiz; Sonnblickkees, Vernagtferner, Kesselwandferner und Hintereisferner in Österreich; Careser in Italien). Die Einheit von 1 m w.e. entspricht ungefähr 1,1 m mittlerer Eisdicke über die gesamte Gletscherfläche. Daten: World Glacier Monitoring Service

Der alpenweite Gletscherschwund seit 1850 stimmt gut mit dem beobachteten Erwärmungstrend der Atmosphärentemperatur in dieser Zeitperiode überein, wobei der Beginn des Gletscherschwundes möglicherweise zunächst durch eine Abnahme der Winterniederschläge in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ausgelöst wurde. Die zeitweisen Wiedervorstöße der Gletscher um 1890, 1920 und zwischen 1965 und 1985 lassen sich durch vorhergehende feuchtere und kältere Perioden mit reduzierter Sonnenscheindauer und gesteigerten Winterniederschlägen erklären. Der Trend von zunehmend negativen Massenbilanzen seit 1980 ist konsistent mit der Erwärmung in dieser Periode.

Ein interessanter Zusammenhang besteht zwischen dem Nordatlantischen Oszillationsindex (NAO-Index) für die Wintermonate und den Gletschermassenbilanzen. So waren die Perioden mit positiven Massenbilanzen zwischen 1960 und 1980 geprägt durch einen negativen und die Jahre mit negativen Massenbilanzen nach 1980 durch einen positiven NAO-Index. Bei einem negativen NAO-Index verlaufen die Sturmbahnen der planetaren Westwinddrift weiter südlich und bringen dem Alpenraum intensivere Winterniederschläge. Bei einem positiven NAO-Index profitieren dagegen die Gletscher der norwegischen Westküste von höheren Niederschlagsmengen, während in den Alpen kühlere und trockenere Bedingungen vorherrschen.

Eine wichtige Rolle für die Energiebilanz spielt auch der Verschmutzungsgrad der Atmosphäre. Dieser war in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wesentlich höher als in der ersten, was zu einem Rückgang der einfallenden Strahlung an der Erdoberfläche (*solar dimming*) und zu einer Reduktion der Gletscherschmelze führte. Neueste Studien zeigen, dass nach der Einführung von verbesserten Filtersystemen in den späten 1980er-Jahren die Atmosphäre seit 1990 wieder klarer wurde, wodurch der Anteil der Gletscherschmelze allein durch die dadurch indirekt erhöhte Solarstrahlung zugenommen haben dürfte.

Der neueste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) zeigt, dass die Klimaänderungen in den sieben Jahrhunderten vor 1950 nicht nur durch interne Klimavariabilität erklärt werden können, sondern dass Vulkanausbrüche, Änderungen in der Solarstrahlung sowie, ab dem frühen 20. Jahrhundert, anthropogene Einflüsse (Treibhausgase, Aerosole, Landnut-

zungsänderungen) einen entscheidenden Einfluss ausüben. Der beobachtete globale Temperaturanstieg seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist ohne den anthropogen verursachten Anstieg der Treibhausgaskonzentration nicht mehr zu erklären.

Abschätzung der Gletscheränderungen im 21. Jahrhundert

Teilt man das abgeschätzte Gletschervolumen der Alpen um 2000 (75 km^3) durch die gesamte Eisfläche zu diesem Zeitpunkt (2270 km^2), so ergibt sich eine mittlere Eisdicke von 30–35 m, wobei viele kleine Gletscher dünner und einige große im Einzelfall sehr viel mächtiger sind. Der Große Aletschgletscher weist an seiner dicksten Stelle beim Konkordiaplatz rund 800–900 m Eismächtigkeit auf. Vergleicht man nun die Schwundraten der letzten 25 Jahre ($-0,75 \text{ m w.e.}$) oder seit der Jahrtausendwende ($-1,0 \text{ m w.e.}$) mit der mittleren Eisdicke, so wird klar, dass bei einem anhaltenden Trend von hohen, oder gar beschleunigten Massenverlusten viele alpine Gebirgsgruppen in den nächsten Jahrzehnten eisfrei werden dürften.

Das IPCC ging in seinem 3. Sachstandsbericht (IPCC 2001) von einem globalen Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts von 1,4 bis $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ aus (*Abbildung. 6*). Im neuesten, 4. Bericht reicht die gesamte Bandbreite der Szenarien von $+1,1$ bis $+6,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (IPCC 2007). Die Szenarien für die Niederschlagsmengen in den Alpen sind nicht einheitlich und schwanken zwischen minus 30 % und plus 30 %, wobei – gemäß den verwendeten Klimamodellen – der Winterniederschlag eher zu- und der Sommerniederschlag eher abnehmen dürfte.

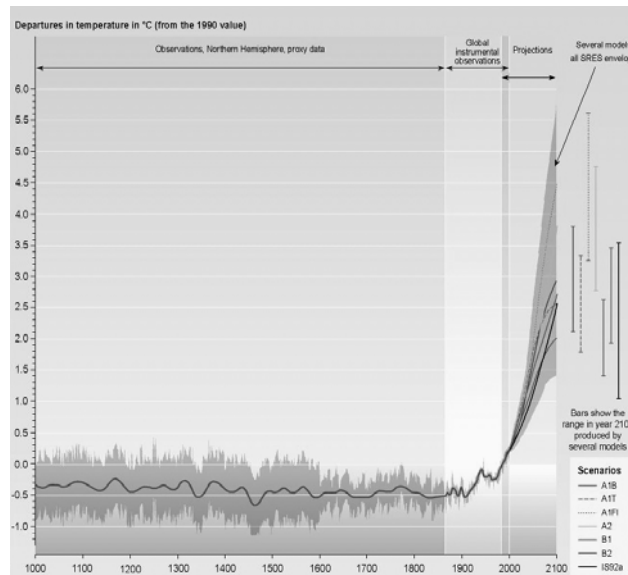


Abbildung 6: Variation der globalen Jahresmitteltemperatur von 1000–2100. Die Abweichung der globalen Temperatur vom Mittelwert des Jahres 1990 (Linien) und Bandbreiten der Unsicherheiten (graue Schattierung) basieren auf Proxydaten der Nordhemisphäre (1000 bis 1860), globalen Messungen (1860 bis 2000) und Klimamodellierungen für verschiedene Treibhausgas-Szenarien (2000–2100). Quelle: IPCC (2001)

Um den Einfluss solcher Klimaszenarien auf die Alpengletscher abzuschätzen, wurde ein Computermodell entwickelt, das die Vergletscherung über den gesamten Alpenbogen für die Referenzperiode 1971–1990 modellieren und potenzielle Änderungen simulieren kann. Diese Modellexperimente haben gezeigt, dass die Alpengletscher bei einem Anstieg der Sommertemperatur um 3 °C rund 80 % ihrer Eisfläche verlieren werden (*Abbildungen 7a und b*). Bei einer Erwärmung um 5 °C würden die Alpen praktisch eisfrei werden. Bei den pessimistischen Klimaszenarien dürften nur die größten und höchstgelegenen Alpengletscher, wie etwa der Große Aletschgletscher, bis ins 22. Jahrhundert überdauern. Allerdings dürfte sich ihre Erscheinungsform dann wesentlich vom heutigen, imposanten Anblick unterscheiden. Die Berechnungen ergeben zudem, dass für eine Kompensation des Anstiegs der mittleren Sommertemperatur um 1 °C eine Zunahme des jährlichen Niederschlags von etwa 25 % notwendig wäre.

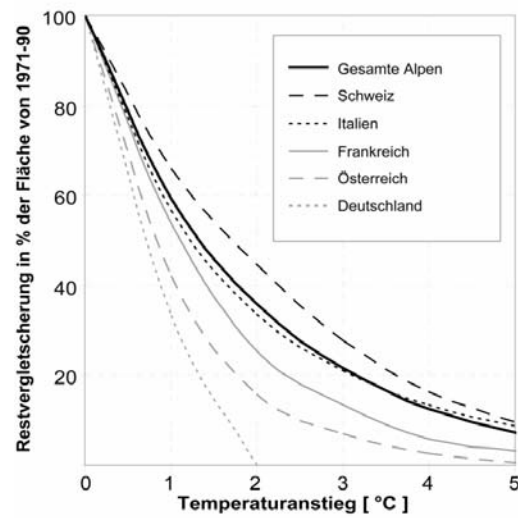
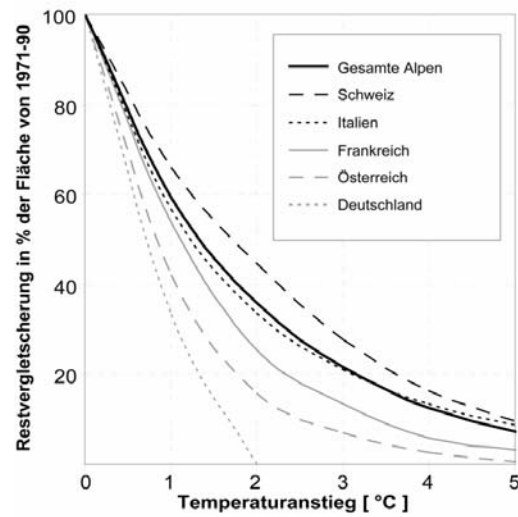


Abbildung 7a und b: Modellierter Alpenvergletscherung (klimatisches Akkumulationsgebiet) unter Annahme eines Anstiegs der Sommertemperatur um 1 bis 5 °C und/oder einer Änderung des Jahresniederschlages. Die punktierte Linie entspricht reinen Temperaturänderungen, während die anderen Linien

kombinierte Temperatur- und Niederschlagsänderungen darstellen. Das Total von 100 % entspricht der alpinen Gesamtvergletscherung der Referenzperiode (1971–1990). b) Modellierter Rückgang der Vergletscherung (klimatisches Akkumulationsgebiet) der Alpenländer unter Annahme eines Anstiegs der Sommertemperatur um 1 bis 5 °C. Das Total von 100 % entspricht der Vergletscherung der Referenzperiode (1971–1990). Die 100-%-Marken der Linien für die einzelnen Alpenländer beziehen sich auf den Anteil des entsprechenden Alpenlandes an der Gesamtvergletscherung. Quelle: Zemp et al. (2006)

Fazit

Nach dem Maximalstand der letzten Eiszeit vor mehr als 20 000 Jahren haben sich die Alpengletscher im Spätglazial von den Moränenständen im Vorland in die Bergtäler zurückgezogen. Während der letzten 11 500 Jahre (Holozän) variierten die Gletscher innerhalb einer relativ konstanten Schwankungsbreite, wobei der letzte Vorstoß der Kleinen Eiszeit um 1850 häufig die maximale Ausdehnung markierte. Seither ist in den gesamten Alpen eine generelle Tendenz zum Gletscherschwund zu verzeichnen. Die Gletscher haben zwischen 1850 und 2000 rund die Hälfte ihrer Gesamtfläche und rund zwei Drittel ihres Gesamtvolumens verloren. Seit 1980 zeichnet sich ein Trend zu überdurchschnittlichen und beschleunigten Eisverlusten ab.

Europäische Alpen bald ohne Gletscher? – Diese Frage mit einem simplen Ja oder Nein zu beantworten wäre zu pauschal. Es gab während des Holozäns verschiedene Phasen, in denen die Alpengletscher weniger ausgedehnt waren als gegen Ende des 20. Jahrhunderts. Die Modellexperimente zeigen aber, dass selbst in einem um 5 °C wärmeren Klima noch einige Gletscher mit Akkumulationsgebieten über 3500 m Meereshöhe – allerdings stark geschrumpft – existieren. Die Alpen waren somit seit dem Ende der letzten Eiszeit wohl kaum zu irgendeinem Zeitpunkt ganz ohne Gletscher.

Der seit dem Hochstand von 1850 beobachtbare Gletscherschwund entspricht angenähert gut dem gemessenen Temperaturanstieg in den Alpen von 1 bis 1,5 °C über diesen Zeitraum. Bei einem zusätzlichen Temperaturanstieg von 1,1 bis 6,4 °C, was gemäß den Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert durchaus plausibel ist (IPCC 2007), wird der Gletscherrückgang wohl die Bandbreite der bis heute bekannten holozänen Variabilität verlassen – ganze Alpenregionen werden sich von ihren Gletschern verabschieden müssen.

Danksagung

Unser Dank geht an die zahlreichen Personen und Institutionen, die den World Glacier Monitoring Service seit vielen Jahren mit ihren aktuellen Gletscherdaten beliefern. Die Studien, auf denen dieser Beitrag basiert, wurden hauptsächlich durch das ALP-IMP-Projekt innerhalb des EC-Programms „Environment/Global Change“ und durch das Geographische Institut der Universität Zürich finanziert.

Literaturhinweise

- Holzhauser, H.P., Magny, M. & Zumbühl, H.J.* (2005): Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15 (6): p. 789–801. Online verfügbar unter: <http://www.ingentaconnect.com/content/sage/hol/2005/00000015/00000006/art00002>.
- IPCC* (2001): *Climate Change 2001*, Cambridge. Online www.ipcc.ch.
- IPCC* (2007): *Climate Change 2007: The Scientific Basis. Summary for Policymakers*, Cambridge. Online www.ipcc.ch.
- Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M. and Paul, F.* (2006): Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33, L13504, doi:10.1029/2006GL026319. Online www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL026319.shtml.
- Zemp, M., Paul, F., Hoelzle, M. and Haeberli, W.* (2007): Glacier fluctuations in the European Alps 1850–2000: An overview and spatio-temporal analysis of available data, in: Orlove, B., Wiegandt, E. and B. Luckman (eds.): *The darkening peaks: Glacial retreat in scientific and social context*, Los Angeles.

„Der Klimawandel ... ist Produkt erfolgreicher Industrialisierung, die ihre Folgen für Natur und Mensch systematisch missachtet.“

Ulrich Beck
